



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



Martin Pécsy

Autoreferát dizertačnej práce

Príspevok ku kalibrácii LAr kalorimetrov experimentu ATLAS

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:

4.1.5. jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava, 16.5.2011

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky.

Predkladateľ: Mgr. Martin Pécsy
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Mlynská Dolina
842 48 Bratislava 4
Slovensko

Školiteľ: prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
RNDr. Pavol Stríženec, CSc.

Oponenti: prof. RNDr. Anna-Zuzana Dubničková, DrSc., Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, UK, Bratislava
RNDr. Jozef Urbán CSc., Katedra jadrovej fyziky a subjadrovej fyziky - Ústav fyzikálnych vied PF UPJŠ Košice
RNDr. Alice Valkárová, DrSc., Ústav časticové a jaderné fyziky Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy Praha

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná o h
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou
predsedom odborovej komisie
(uviesť dátum vymenovania)**

.....
(študijný odbor) (názov študijného programu doktorandského štúdia)

na
(presná adresa miesta konania obhajoby dizertačnej práce)

Predseda odborovej komisie:

.....
(meno a priezvisko s uvedením titulov a hodností
a presná adresa jeho zamestnávateľa)

Obsah

Úvod	2
1 Ciele dizertačnej práce	3
2 Experiment ATLAS	3
3 Rekonštrukcia energie a kalibračné postupy	4
3.1 Lokálna hadrónová kalibrácia	5
4 Validácia kalibrácie kalorimetrického systému experimentu ATLAS	8
4.1 Testy odozvy detektora a kalibrácie EM škály	8
4.2 MC štúdie a klasifikačné testy	9
4.3 Kombinované testy koncového a dopredného kalorimetra experimentu ATLAS vo zväzkoch	10
4.3.1 Výsledky a validácia	12
4.4 Nástroj na extrapoláciu častíc a možné vylepšenia metódy LC	14
5 Záver	16
Publikácie	16
Literatúra	17
Summary	18

Úvod

V súčasnosti najväčšie pracovisko časticovej fyziky prevádzkuje Európska organizácia pre jadrový výskum (CERN), založená v roku 1954. V posledných rokoch je veľká pozornosť venovaná najväčšiemu urýchľovaču častíc na svete LHC - Veľký hadrónový urýchľovač. Tento urýchľovač bol uvedený do prevádzky v septembri roku 2008 a bude zrážať častice pri doposiaľ najväčších energiách zrážok proti bežným zväzkov 14 TeV. Od LHC sa očakáva, že prinesie nové poznatky do Štandardného modelu (ŠM) a taktiež má potenciál v objavoch vo fyzike za ŠM. Zrážky na LHC budú skúmané pomocou šiestich veľkých experimentov. Jedným z nich je aj experiment ATLAS, ktorý je typický kolažderový detektor skonštruovaný na analýzu zrážok nespočetného množstva častíc a skúmania širokého spektra fyzikálnych javov. Pre dosiahnutie fyzikálnych cieľov experimentu ATLAS je dôležité najmä presné určenie dráh letu väčšiny častíc prelietajúcich kalorimetrom, určenie ich energie a ich identifikácia. Energia a smer letu častíc sa určuje v kalorimetrickom systéme.

Kalorimetrický systém experimentu ATLAS je nekompensovaný, tzn. že je jeho odozva pre elektromagnetické (EM) a hadrónové spršky rôzna, čo vyžaduje dodatočnú softvérovú kalibráciu odozvy kalorimetra. Kalibrácia kalorimetrického systému experimentu ATLAS pozostáva z niekoľkých krokov. Prvým krokom je základná kalibrácia signálu z elektroniky a získanie EM škály. Následne sa pokračuje ku kalibrácii energie častice. Cieľom hadrónovej kalibrácie sú korekcie na nekompensovanosť kalorimetra vedúce k správnej rekonštrukcii deponovanej energie. Jednou z metód tejto kalibrácie je lokálna hadrónová kalibrácia (LC) založená na rekonštrukcii objektov v kalorimetri po sprške.

V práci sú prezentované príspevky ku rôznym krokom kalibrácie, hlavne v rámci LC. Príspevok ku kalibrácii signálu a EM škály je v rámci uvádzania experimentu ATLAS do prevádzky, keď analýzy dát z kozmických miónov boli jedinou možnosťou testovať detektor inštalovaný v experimentalnej hale. K tejto časti patrí aj analýza homogenity odozvy jednotlivých čítacích kanálov HEC kalorimetra na dátach pochádzajúcich zo zrážok na LHC. V tejto analýze je dôležité identifikovať problematické kanály, ktoré prispievajú ku zlej odozve kalorimetra. Pre optimalizáciu metód LC je nevyhnutné testovať aj alternatívne prístupy v jednotlivých krokoch LC. K tejto časti kalibrácie prispievajú dve alternatívne metódy klasifikácie, ktoré boli testované. Pretože vyvíjať a meniť kalibráciu kalorimetra, ktorý už beží v reálnom experimente je zložité, moduly kalorimetrov sú testované vo zväzkoch monoenergetických častíc.

Výsledky validácie LC v testovacích zväzkoch sú prezentovaná ďalšej časti. Pri týchto testoch sa kalibrácia testuje a optimalizuje. Posledný príspevok sa venuje možnosti zlepšenia LC na úrovni sledovania stôp jednotlivých častíc v kalorimetri.

Dizertačná práca prezentuje príspevky ku rôznym krokom kalibrácie, hlavne LC, jej charakter je v globále skôr metodologický.

1 Ciele dizertačnej práce

Príspevok v rámci štúdia odozvy HEC kalorimetra a kalibrácie EM škály:

1. **Analýza dát kozmických miónov.** Využitie algoritmu rekonštrukcie dráh kozmických miónov v HEC kalorimetri pomocou tile kalorimetra na selekciu dostatočného množstva eventov z globálnych kozmických runov experimentu ATLAS na signálne štúdie odozvy HEC kalorimetra a overenie EM škály.
2. **Analýza zrážok na LHC.** Získanie odozvy HEC kalorimetra v zrážkach na LHC z jesene 2010 a identifikácia problematických kanálov a homogenity odozvy.

Príspevok v rámci MC štúdií a klasifikačných testov:

3. **Alternatívne metódy klasifikácie klastrov.** Pomocou nových prístupov ku klasifikácii klastrov v LC vypočítať nové váhy a otestovať výsledky LC použitím týchto nových váh.

Príspevok v rámci validácie LC:

4. **Validácia LC v testoch na zväzkoch.** Štúdia kompletnej LC v kombinovanom teste koncového kalorimetra experimentu ATLAS.

Príspevok v rámci zlepšenie metódy LC

5. **Vývoj a testy softvérového nástroja na extrapoláciu dráh častíc do kalorimetra.**

2 Experiment ATLAS

Experiment ATLAS [1, 2] na urýchľovači LHC [3] je viacúčelový detektor kombinujúci vertexové a dráhové detektory vo svojom strede, obklopené kalorimetrickým

systémom a vonkajším miónovým spektrometrom. ATLAS je navrhnutý tak, aby pokryl čo najširšie spektrum fyziky na LHC.

Kalorimetrický systém pozostáva z rôznych samplingových kalorimetrov symetrických v azimutálnom uhle ϕ ¹. Samplingové kalorimetre pozostávajú z aktívneho a pasívneho média a sú charakterizované tzv. *sampling fraction*. Kalorimetrický systém experimentu ATLAS sa skladá z EM a hadrónových kalorimetrov rozdelených na centrálnu, tzv. *barrel*, časť a dva koncové, tzv. *end-cap*, kalorimetre. Takto navrhnutý systém kalorimetrov predstavuje výborné pokrytie EM a hadrónových spířšok v η^2 a ϕ . Vnútoraná časť toho systému je tvorená samplingovými kalorimetrami na báze tekutého argónu (LAr) s vysokou granularitou s výborným určením energie a polohy častice. Tieto kalorimetre sú najbližšie k interakčnému bodu pokrývajú oblasť pseudorapidity $|\eta| < 3.2$. Sú umiestnené v troch kryostatoch - centrálny kalorimeter v centrálnom kryostate, koncové kalorimetre v koncových kryostatoch. Koncové kryostaty obsahujú EM koncový kalorimeter (EMEC), hadrónový koncový kalorimeter (HEC) a dopredný kalorimeter (FCal). Koncové kalorimetre pokrývajú vonkajšiu oblasť pseudorapidity $|\eta| > 1.5$. Dopredné kalorimetre rozširujú pokrytie spířšok až po oblasť $|\eta| = 4.9$. LAr kalorimetre sú obklopené hadrónovým scintilačným, tzv. *tile*, kalorimetrom pokrývajúcim oblasť $|\eta| < 1.7$. Tile kalorimeter je rozdelený na centrálnu, tzv. *barrel*, časť a dva menšie rozšírené centrálné kalorimetre na každej strane centrálného kalorimetra.

3 Rekonštrukcia energie a kalibračné postupy

Na vykonanie analýzy fyzikálnych procesov je nutné v kalorimetroch rekonštruovať základné fyzikálne objekty. Rekonštrukcia energie častice v LAr kalorimetri spočíva v konverzii indukovaného prúdu vyvolaného preletom častice detektorom na energiu častice depozitovanú v detektore. Toto je obsiahnuté v celom procese rekonštrukcie, ktorý začína meraním ionizačného prúdu v aktívnom médiu kalorimetra. V ďalšom kroku sú signály z elektroniky spracovávané a pomocou offline rekonštrukčných algoritmov sú odvodené fyzikálne objekty. Celková energia depozitovaná v kalorimetri je sumou parciálnych energií depozitovaných v jednotlivých čítacích bunkách kalorimetra. Tieto bunky sú v procese rekonštrukcie združované do objektov reprezentujúcich spířšky, tzv. *klastrov*. Cieľom je dosiahnuť optimálny odhad uloženej energie pre

¹ Azimutálny uhol ϕ je definovaný okolo osi zväzku.

² Pseudorapidita η je definovaná ako $\eta = -\ln \left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$, polárny uhol θ je uhol od osi zväzku.

každú bunku.

Kalibrácia EM škály. Prvým krokom hadrónovej kalibrácie je získanie EM škály, t.j. odozvy kalorimetra na častice interagujúce EM procesmi. Táto škála je prirodzenou energetickou škálou a kalibračné konštanty by mali odrážať len energiu deponovanú v bunke a nemali by korigovať iné efekty. Kalibračné konštanty sú získané detailnými porovnaniami Monte-Carlo (MC) simulácií a experimentálnych dát získaných z testov modulov kalorimetrov vo zväzkoch častíc známej energie.

3.1 Lokálna hadrónová kalibrácia

Pre odozvu kalorimetrov experimentu ATLAS na elektromagnetické (e) a hadrónové (h) spršky platí $e/h > 1$, čo znamená, že odozva na hadrónové spršky je menšia. Cieľom hadrónovej kalibrácie je urobiť korekcie na tieto rozdiely a tak dosiahnuť správny odhad uloženej energie. Pre experiment ATLAS sú použité dva prístupy hadrónovej kalibrácie. Globálna metóda rekonštruje konečné hadrónové fyzikálne objekty (jety) a tie kalibruje. Lokálna metóda najprv rekonštruje objekty na úrovni kalorimetra (klastre buniek) a tieto sú následne kalibrované.

Lokálna hadrónová kalibrácia [4] rekonštruje trojrozmerné topologické klastre [5]. Tieto klastre sa sformujú okolo buniek s lokálnym maximom deponovanej energie. V ďalšom sú tieto klastre klasifikované ako EM alebo hadrónové. Hadrónové klastre sú váhované H1 váhami [6], ktoré kompenzujú nižšiu odozvu na hadrónové spršky. Váhy sú počítané pomocou detailných Geant4 [7] simulácií nabitých piónov, pri ktorých je použitý mechanizmus tzv. *kalibračných hitov*. Pomocou kalibračných hitov je možné porovnať odozvu kalorimetra na danú časticu so skutočnou energiou uloženou v aktívnom, neaktívnom médiu kalorimetra a v tzv. mŕtvom materiáli kalorimetra, pre nasledovné kategórie deponovanej energie:

1. viditeľná EM energia - energia deponovaná elektrónmi a pozitronmi ionizáciou (približne 50% celkovej energie)
2. viditeľná ne-EM energia - energia deponovaná ostatnými časticami ionizáciou (približne 25% celkovej energie)
3. neviditeľná energia - energia deponovaná neionizačnými procesmi, ako napr. rozpady jadier (približne 25% celkovej energie)

4. uniknutá energia - energia uniknutá z detektora vo forme uniknutých častíc, alebo častíc neinteragujúcich s detektorom (zvyšná časť celkovej energie)

Energia z kategórie 3. a 4. je pre kalorimeter neviditeľná a stratená. Váhy sú teda počítané porovnaním skutočnej deponovanej energie³ a sumy všetkých kalibračných hitov v aktívnom a neaktívnom materiály, pre viditeľnú aj neviditeľnú zložku deponovanej energie pre danú bunku.

Jednotlivé kroky LC sú (v zátvorke sú skratky jednotlivých krokov/škál LC, ktoré sú ďalej použité v práci):

- klasifikácia klastrov ako EM alebo hadrónové (EM⁴)
- aplikácia váh na klastre klasifikované ako hadrónové (W)
- korekcie pre energiu uloženú mimo klastrov (OOC)
- korekcie pre energiu uloženú v mŕtvom materiáli (DM)

Klasifikácia klastrov. Cieľom je rozlíšiť klastre s energiou deponovanou EM alebo hadrónovými interakciami. Klasifikácia je založená na analýze tzv. momentov klastrov reprezentujúcich tvar spŕšky a kalibračných hitov zo simulácii nabitých a neutrálnych piónov. Niektoré počítané momenty sú uvedené v tabulke 1. Najvhodnejšie momenty na oddelenie EM a hadrónovej zložky spŕšky sa ukazujú byť momenty opisujúce šírku a dĺžku spŕšky, hĺbku spŕšky a moment opisujúci energetickú hustotu klastrov. Metóda na klasifikáciu klastrov v experimente ATLAS vychádza zo simulácii neutrálnych a nabitých piónov. Klastre sú usporiadané do 4-rozmerného priestoru v $|\eta|$, $E_{klaster}$, $\log_{10}(\lambda_{center})$ a $\log_{10}(\langle\rho\rangle)$. Viac podrobností je uvedených v [4].

Váhovanie. Váha pre jednotlivú bunku kalorimetra je definovaná nasledovne:

$$w_i = \langle E_{cell}^{calib} / E_{cell}^{reco} \rangle, \quad (1)$$

kde E_{cell}^{calib} je suma všetkých kalibračných hitov pre danú bunku a E_{cell}^{reco} je deponovaná energia viditeľná pre kalorimeter. Takto určené váhy sú usporiadané do

³ Energia deponovaná v aktívnom médiu násobenú prevrátenou hodnotou sampling fraction, čím sa dostane celková deponovaná energia na EM škále

⁴ Jednotlivé kroky LC sú kumulatívne, tzn. že keď je spomínaný výsledok pre W-škálu, tak sa tým myslí výsledok po aplikácii EM a W kroku LC.

Moment	Interpretácia
$\langle \eta \rangle$	poloha klastra v η
$\langle \phi \rangle$	poloha klastra v ϕ
$\langle r^2 \rangle$	šírka spŕšky
$\langle \lambda^2 \rangle$	dĺžka spŕšky
lateral	pozdlžny rozptyl spŕšky
longitudinal	priečny rozptyl spŕšky
$\langle \rho \rangle$	energetická hustota
$\langle \lambda_{center} \rangle$	hlĺbka spŕšky
isolation	energeticky váhovaná časť susedných buniek neobsiahnutých v klastroch na vonkajšom obvode klastra

Tab. 1: Vybrané momenty klastrov a ich interpretácia

dvojrozmerných váhovacích tabuliek ako funkcie energie klastra do ktorého bunka patrí, a energetickej hustoty klastra. Tieto tabuľky sú počítané pre rôzne oblasti pseudorapidity $|\eta|$ buniek.

OOO korekcie. Klastre sú budované na základe pomeru signál/šum. Časť energie spŕšky je depozitovaná v bunkách, ktoré neprejdú výberovými kritériami a zostanú mimo klastrov. Tieto bunky tvorí predovšetkým nízkoenergetická zložka spŕšok. Korekcie pre energiu uloženú mimo klastrov sú taktiež počítané pomocou kalibračných hitov priradujúc časť depozitovanej energie⁵ všetkým klastrom v rámci nejakej oblasti. Rovnako ako váhy, OOO korekcie sú taktiež aplikované na rekonštruované klastre v závislosti od $|\eta|$, $E_{klaster}$, $\log_{10}(\lambda_{center})$ a $\log_{10}(\langle \rho \rangle)$.

DM korekcie. Na výpočet korekcií na energiu uloženú v mŕtvom materiáli detektora je taktiež použitý mechanizmus kalibračných hitov. Tieto korekcie sú aplikované na úrovni klastrov. Na výpočet množstva energie stratenej v mŕtvom materiáli pre daný klaster sa používajú rôzne veličiny určené na EM škále. Táto energia je potom pridaná ku energii klastra vo forme zmenenej váhy pre daný klaster. Detailnejší popis je uvedený v [4].

⁵ Celková energia depozitovaná v kalorimetri mimo klastrov je známa zo simulácii. Problémom je ako správne distribuovať túto energiu medzi vytvorené klastre. Viac detailov je uvedených v [4]

4 Validácia kalibrácie kalorimetrického systému experimentu ATLAS

4.1 Testy odozvy detektora a kalibrácie EM škály

Štúdie HEC kalorimetra pomocou kozmických miónov. Testy kalorimetrov pomocou miónov z kozmického žiarenia zohrali významnú úlohu pri postupnom uvádzaní experimentu ATLAS do prevádzky v experimentálnej hale. Kozmické mióny boli jedinou možnosťou ako testovať odozvu už inštalovaných kalorimetrov pred zrážkami na LHC. Tieto testy začali v roku 2005 a globálne kozmické runy boli uskutočnené v rokoch 2008 a 2009.

Kozmické mióny prilietajú do experimentu ATLAS zväčša zhora cez dve prístupové šachty ku detektoru. Dráhy týchto miónov sú podobné projektívnym dráham častíc vyletujúcich po zrážkach v interakčnom bode. Z kozmických eventov je teda možné, na základe rekonštrukcie dráhy miónov prelietajúcich vnútorným detektorom, vybrať pre centrálny kalorimeter vzorku miónov, ktorých dráha je pseudo-projektívna. Takúto analýzu však nie je možné vykonať pre mióny prelietajúce HEC kalorimetrom. Ich dráha je neprojektívna. Ďalším problémom HEC kalorimetra sú jeho veľké čítacie bunky. Na rekonštrukciu energie kozmického miónu v HEC kalorimetri bol pre rekonštrukciu dráhy miónu použitý tile kalorimeter. Takto získaná dráha častice bola extrapolovaná do HEC kalorimetra, čím sa získali bunky, ktorými prelietal mión a z nich sa sformoval klaster. Do takejto rekonštrukcie energie prelietajúceho miónu prispievajú len bunky so signálom od miónu, čím sa eliminoval vplyv buniek so šumovými fluktuáciami.

Pomocou tohto algoritmu bola vyberaná štatistika pre štúdie HEC kalorimetra pomocou kozmických miónov. Eventy s dobrým signálom boli vybrané pre ďalšie štúdie. Pokrytie HEC kalorimetra týmito eventami je zobrazené na obrázku 1.

Testy homogenity odozvy ciel HEC kalorimetra. Pre experiment ATLAS boli vyvinuté špeciálne databázy na uchovanie informácií o jednotlivých čítacích kanáloch kalorimetra. Pre LAr kalorimeter existuje databáza na uchovanie informácie o problematických kanáloch a poskytnutie tejto informácie pre offline rekonštrukciu. Pomocou softvérového nástroja *LArBadChannelTool* je možné získať špecifickú informáciu o jednotlivých kanáloch pomocou ich identifikátora.

Analyzované boli niekoľké runy z jesenného spracovania dát z roku 2010. Pri tejto analýze bolo úlohou identifikovať problematické kanály HEC kalorimetra. Po-

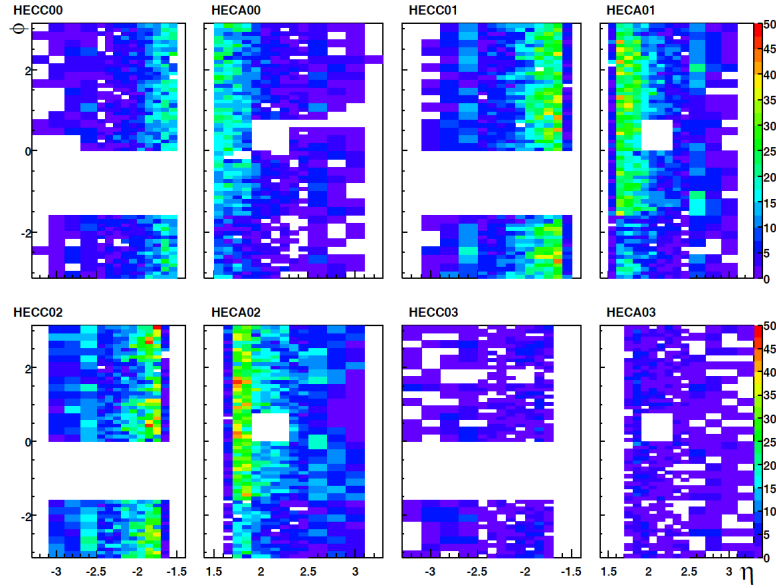


Fig. 1: Pokrytia kanálov HEC kalorimetra runmi vybranými pre ďalšie štúdie. Je vidno nepripojený HEC C modul a jednu časť HEC A kalorimetra.

mocou nástroja *LArBadChannelTool* boli vyberané kanály, ktoré sú v databáze označené ako dobré a ich odozva bola zaznamenaná do histogramu. Ten bol rozdelený tak, aby každý bin reprezentoval práve jeden čítací kanál. Takto boli identifikované problematické kanály v jednotlivých runoch. Všetky identifikované problémy budú odstránené v ďalšom spracovaní runov a uploadnuté do databáz. Problémom je, že tieto problematické kanály sa príliš menia v jednotlivých runoch, čo znamená, že bude nutné vytvárať samostatné databázy pre jednotlivé runy.

4.2 MC štúdie a klasifikačné testy

Pre optimalizáciu algoritmu klasifikácie klastrov a výpočtu váh boli testované alternatívne prístupy.

Alternatívny prístup k určeniu váh. Tento prístup je založený na pridaní ďalšieho momentu klastra ku klasifikácii klastrov, čo by mohlo prispieť k lepšej separácii EM a hadrónovej časti spršky a tým odvodiť presnejšie váhy.

Momenty použité na klasifikáciu klastrov sú opísané v časti 3. V analýze boli k týmto momentom pridávané ďalšie, od ktorých sa očakávalo, že by mohli zlepšiť separáciu spršky. Testovaná bola pozdĺžna a priečna separácia spršky, separácia na základe energetickej hustoty $\langle\rho\rangle$ a radiálna separácia. Cieľom bolo rozhodnúť,

či pridanie ďalšieho momentu ešte môže zlepšiť výsledky LC, alebo či je súčasná klasifikácia dostatočná.

Výsledky ukázali, že pridanie ďalšieho momentu už príliš nezlepšuje výsledky LC. Aj keď bola separácia spŕšky pre každý moment veľmi dobrá, rovnako aj nové váhy, tak vo výsledku bolo zlepšenie len nepatrné.

Alternatívna klasifikácia klastrov. Základná metóda klasifikácie klastrov je v stručnosti opísaná v časti 3 a prezentovaná v [4]. Alternatívna metóda klasifikácie klastrov je založená na odhade EM komponenty spŕšky použitím korelácie medzi hodnotou momentu a EM časťou deponovanej energie, pre nasledovné tri momenty klastra: šírka spŕšky $\langle r^2 \rangle$, dĺžka spŕšky $\langle \lambda^2 \rangle$ a hĺbka spŕšky $\langle \lambda_{center} \rangle$. Táto korelácia je odhadnutá ako lineárna. Z parametrov lineárneho fitu je potom počítaná výsledná váhovaná hodnota EM časti deponovanej energie pre klastre. Viac podrobností je uvedených v [4].

4.3 Kombinované testy koncového a dopredného kalorimetra experimentu ATLAS vo zväzkoch

Metóda LC je založená na detailných MC simuláciách. Kľúčovým krokom je teda validácia tejto kalibračnej schémy na dátach z testov modulov kalorimetrov vo zväzkoch. V týchto testoch sú porovnávané výsledky kalibrácie na reálnych dátach so simuláciami. Takto je možné určiť konštanty použité pri tejto metóde, ako aj optimalizovať jednotlivé algoritmy. V tejto časti sú prezentované výsledky validácie LC v kombinovanom teste koncového kalorimetra vo zväzkoch (TB) 2004 [8].

Tento TB pokrýva obzvlášť problematickú oblasť v predných oblastiach pseudorapidity $2.5 < |\eta| < 4.0$. V tejto oblasti sa nachádza prechod od EMEC a HEC kalorimetra ku FCal kalorimetru. Usporiadanie testu bolo zvolené tak, aby sa čo najviac blížilo konfigurácii reálneho ATLAS experimentu, nie len vzhľadom na použité moduly kalorimetrov, ale aj usporiadanie ďalších podporných štruktúr a rozloženie mŕtveho materiálu. Cieľom je pre túto oblasť získať hadrónovú kalibráciu, zahrňujúcu aj korekcie pre mŕtvy materiál. V predchádzajúcej analýze [8] boli prezentované výsledky pre EM škálu a výsledky pre jednoduchú hadrónovú kalibráciu. Táto analýza pokračuje ďalej k plnej hadrónovej kalibrácii, ktorá bude použitá na experimente ATLAS.

Usporiadanie TB obsahovalo nasledovné moduly kalorimetrov experimentu AT-

LAS⁶: modul vnútorného kola EMEC kalorimetra, predné a zadné koleso HEC kalorimetra a moduly FCal1 a FCal2.

Dáta, simulácie a rekonštrukcia. TB sa uskutočnil na H6 zväzku na urýchľovači SPS v CERNe, ktorý poskytoval hadróny, elektróny a mióny v rozmedzí energie $5\text{GeV} \leq E \leq 200\text{GeV}$. Analýza je zameraná na energetické skeny v bodoch D a H, zodpovedajúcim EMEC/HEC a FCal oblasti ($\eta = 2.75$ a 3.8 v experimente ATLAS) a vertikálny pozičný sken pokrývajúci prechodovú, tzv. *crack*, oblasť medzi kalorimetrami.

Simulácie boli robené pre dva fyzikálne listy - QGSP-BERT a FTFP-BERT [9].

Pri rekonštrukcii depozitovanej energie bol použitý algoritmus topologickej klasifikácie prezentovaný v časti 3, ktorý bol v tomto TB prvý krát použitý v plnej verzii na reálne dáta. Po rekonštrukcii boli na selekciu eventov a klastrov pre ďalšiu analýzu použité nasledovné kritéria:

Kritériá pre výber eventov:

- i.a)* pre dáta: Žiadny signál v miónovom trigri. Takto sú vylúčené eventy, ktoré obasuju mióny.
- i.b)* pre simulácie: Pomocou signálov zo scintilačných komôr sa identifikuje a vylúči miónový event.
- ii.)* Dobrá rekonštrukcia dráhy v rovine X and Y .
- iii.)* Nenulový počet rekonštruovaných klastrov.

Kritériá pre výber klastrov:

- iv.)* Kladná energia klastra.
- v.)* Kladná hodnota momentu hĺbky klastra.

Rekonštruovaná energia eventu je definovaná ako suma energií všetkých rekonštruovaných klastrov.

⁶ Tieto moduly boli buď identické modulom ATLAS kalorimetrov alebo boli ich prototypmi. Z dôvodu obmedzeného miesta v kryostate použitom pri TB testoch, bol počet použitých modulov limitovaný. Viac napr. v [8].

4.3.1 Výsledky a validácia

Energetické skeny v oblasti EMEC/HEC. Pre validáciu LC v tejto oblasti boli analyzované skeny s elektrónmi a nabitými piónmi v bode D.

Pri analýze 193 GeV elektrónov bol pozorovaný rozdiel medzi dátami a simuláciami na úrovni 2-4%. Tento rozdiel spôsobuje tzv. *cross-talk* efekt medzi jednotlivými kanálmi modulu EMEC, dôsledkom čoho je, že bunky si vymieňajú časť svojej energie, čo vedie ku koreláciám signálov susedných buniek. Na popis tohto efektu bol vyvinutý špeciálny softvérový balík a po jeho aplikácii je dobrá zhoda medzi experimentálnymi dátami a simuláciami.

Pre bod D boli taktiež analyzované zväzky nabitých piónov siedmich rozličných energií v rozmedzí od 10 do 200 GeV. Prezentované sú rozdelenia dvoch momentov klastrov. Pre moment energetickej hustoty klastra je rozdiel medzi hodnotami zo simuláciami a dátami, zatiaľ čo pre moment hĺbky spršky je medzi nimi dobrá zhoda. Ďalej je prezentovaná aplikácia jednotlivých krokov LC pre energetickú odozvu. Táto odozva je po aplikácii posledného kroku blízko jednotky, lepšie zhoda so simuláciami je pre QGSP-BERT fyzikálny list. Posledné je prezentované energetické rozlíšenie kalorimetra. Zlepšenie po aplikácii LC je približne 5-15% pre dáta aj simulácie.

Energetické skeny v oblasti FCal. Pre validáciu LC v tejto oblasti boli analyzované skeny s elektrónmi a nabitými piónmi v bode H.

Pre nabité pióny sú prezentované výsledky pre rovnaké analýzy ako pre bod D. Výsledky oboch simulácií sú pre moment energetickej hustoty blízke, avšak opäť je pozorovaný malý posun oproti dátam. Pri energetickej odozve je lepšia zhoda dát s FTFP-BERT simuláciami. Rozlíšenie sa po aplikácii LC zlepši v globále o 10-25%.

Vertikálny sken s nabitými piónmi. Na validáciu LC v prechodovej oblasti medzi EMEC/HEC FCal kalorimetrami bol analyzovaný vertikálny sken nabitých piónov energie 200 GeV.

Na obrázku 2 je ukázaná energetická odozva kalorimetra pre 200 GeV pióny. Moduly EMEC/HEC kalorimetrov pokrývajú oblasť $\eta \leq 3.2$, moduly FCal $\eta \geq 3.1$ a medzi nimi sa nachádza prechodová oblasť. Výsledky sú ukázané pre EM a výslednú škálu LC. Zhoda medzi dátami a simuláciami je dobrá. Obzvlášť dobrá je v oblastiach pokrytých detektormi a zhoršuje sa v prechodovej oblasti. Energetická odozva v prechodovej oblasti sa po aplikácií korekcií na mŕtvy materiál zvýši. V ďalšom je porovnaný výsledok energetickej odozvy dát použitím váh počítaných

pomocou QGSP-BERT alebo FTFP-BERT fyzikálnych listov. Tieto výsledky sa líšia o 2-3%.

Energetické rozlíšenie kalorimetrov vo vertikálnom skene je ukázané na obrázku 3. Po aplikácii LC sa rozlíšenie zlepši pre celú oblasť skenu. Rozlíšenie je v prechodovej oblasti, v porovnaní s oblasťami pokrytými detektormi, horšie pre obe prezentované škály. Tento rozdiel sa však aplikáciou LC znižuje, pre prechodovú oblasť je zlepšenie na úrovni asi 4-5%. Zhoda medzi dátami a simuláciami je dobrá pre oblasť FCal kalorimetra, zhoršuje sa v prechodovej oblasti a istá nezhoda je aj pre EMEC/HEC oblasť. Rovnaký rozdiel je pozorovaný aj vo výsledkoch z energetických skenov pre tento región.

Ďalšia analýza predstavuje porovnanie pomeru rekonštruovanej energie a energie v kalibračných hitoch v každom kroku LC. Korekcie aplikované v každom kroku LC fungujú veľmi dobre a rozdiely v rekonštruovanej energii a energii v kalibračných hitoch sú malé.

Ďalšia časť analýzy predstavuje štúdium spršok vo vertikálnom skene prostredníctvom momentov klastrov. Analyzovaných bolo 7 momentov klastrov popisujúcich vlastnosti spršok. Keďže metóda LC vychádza z vlastností klastrov, štúdium jednotlivých momentov a porovnanie výsledkov z experimentálnych dát a simulácií je dôležité pre validáciu kalibrácie. Na obrázku 4 je ukázaná stredná hodnota momentu klastra hĺbka spršky ako funkcia η zväzku a na obrázku 5 jeho rozdelenie pre tri vybrané oblasti v skene. Vidno, že tento moment má zhruba konštantnú hodnotu pre

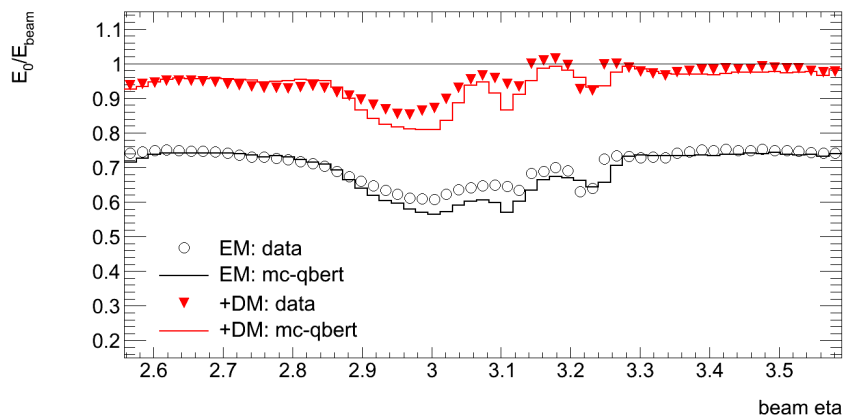


Fig. 2: Energetická odozva kalorimetra vo vertikálnom skene pre 200 GeV pióny pre EM a finálnu škálu LC ako funkcia η zväzku. Ukázané výsledky sú pre experimentálne dáta a simulácie s použitím QGSP-BEERT fyzikálneho listu.

EMEC/HEC a FCal oblasť a mení sa v prechodovej oblasti. Z oboch obrázkov možno vidieť dobrú zhodu medzi dátami a simuláciami pre tento moment. Aj keď pozičné a energetické skeny nie sú umiestené v presne rovnakej oblasti kalorimetrov, je možné porovnať ich výsledky. Pre všetky momenty sú výsledky veľmi podobné, tam kde je rozdiel medzi dátami a simuláciami, tak ho vidno v oboch skenoch. Celkovo sú spŕšky opísané oboma fyzikálnymi listami veľmi blízke, nejaké rozdiely sú pozorované medzi simuláciami a dátami. Hadrónové spŕšky predpovedané v simuláciách sú viac kompaktné ako je pozorované v dátach.

Horizontálny sken s nabitými piónmi. Na testovanie homogenity odozvy kalorimetra bol analyzovaný horizontálny sken 180 GeV nabitých piónov. Tento sken pokrýva oblasť EMEC/HEC kalorimetrov. Zhoda medzi dátami a simuláciami v tomto skene nie je až tak dobrá ako vo vertikálnom. Zrejme je to spôsobené tým, že zatiaľ čo vertikálny sken je umiestnený uprostred kalorimetrov, horizontálny je bližšie ku kraju, čo ukazuje na možný problém s únikom časti energie z kalorimetra a na problém s popisom spŕšok v simuláciách pre túto oblasť.

4.4 Nástroj na extrapoláciu častíc a možné vylepšenia metódy LC

V metóde LC je stále priestor na zlepšenie a rozšírenie. S týmto zámerom bol vyvinutý softvérový nástroj na extrapoláciu dráh častíc do kalorimetra, *JetParticleEx-*

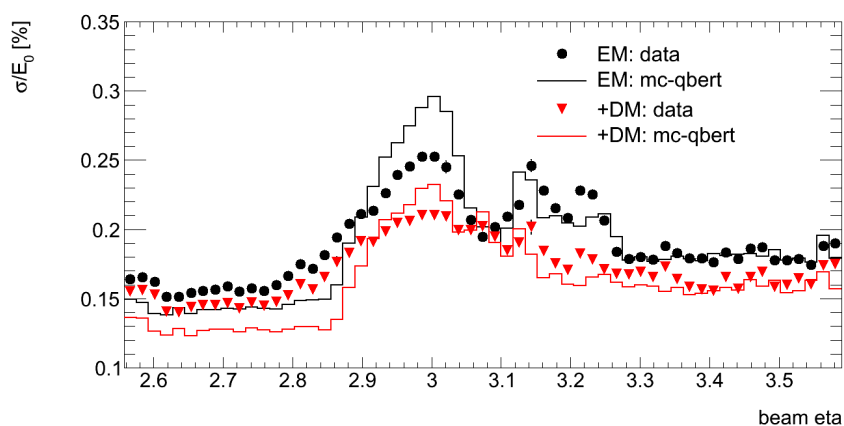


Fig. 3: Energetické rozlíšenie pre pióny energie 200 GeV vo vertikálnom skene pre EM a finálnu škálu ako funkcia η zväzku. Experimentálne dáta sú porovnané s QGSP-BERT simuláciami.

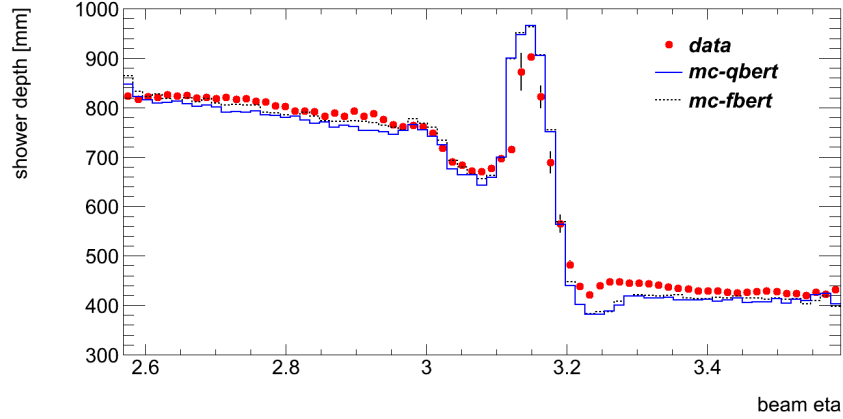


Fig. 4: Stredná hodnota momentu klastra hĺbka spršky pre 200 GeV pióny vo vertikálnom skene ako funkcia η zväzku, pre experimentálne dáta a simulácie pomocou QGSP-BERT a FTFP-BERT fyzikálnych listov.

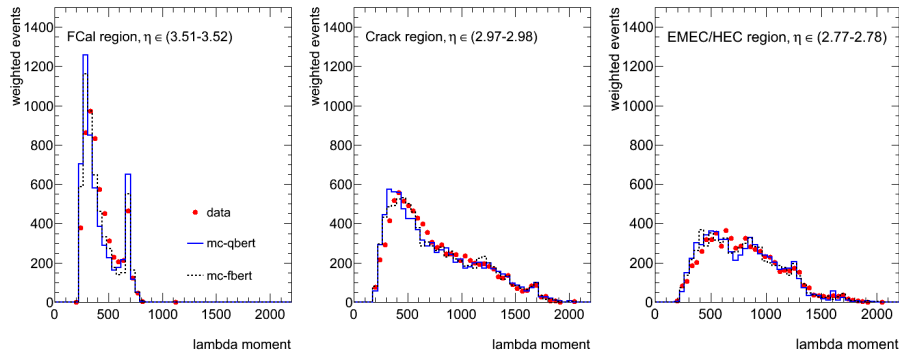


Fig. 5: Moment klastra hĺbka spršky pre 200 GeV v troch vybraných oblastiach vertikálneho skenu - zľava FCal, prechodová oblasť a EMEC/HEC.

trapolationTool.

Algoritmus vytvárania klastrov sformuje klaster v okolí lokálneho maxima depositovanej energie. Tieto klastre v sebe nezahŕňajú informáciu o tom, z akej spršky pochádzajú a sprška je rekonštruovaná len na základe polohy klastrov. Problém pri takejto rekonštrukcii môže spôsobovať nízkoenergetická zložka spršky, ktorej energia nie je správne rekonštruovaná. Do rekonštruovanej energie nie sú zahrnuté častice, ktorých dráhy sú zakrivené magnetickým poľom natoľko, že končia mimo rekonštruovanej spršky, alebo je ich energia príliš malá na to, aby prenikli do kalorimetra. Naopak, k rekonštruovanej energii môžu prispievať častice, ktoré sa sem dostali vplyvom zakrivenia dráhy v magnetickom poli dostali z inej spršky. Pre LC je preto zaujímavé skúmať efekt zakrivenia dráh častíc a tak získať ďalšiu informáciu na

zlepšenie kalibrácie. Toto umožňuje vyvinutý nástroj *JetParticleExtrapolationTool*, ktorý je súčasťou oficiálneho softvérového balíka experimentu ATLAS. Jeho základnou myšlienkou je zobrať všetky stabilné častice po interakcii, extrapolovať ich dráhy do kalorimetra a z tých častíc, ktorých dráhy smerujú do klastrov vytvoriť nový jet.

Príspevok *JetParticleExtrapolationTool* k LC je štúdiách založených na úrovni častíc. Umožňuje skúmať energiu depozitovanú časticami vo vnútri, ale aj mimo klastrov, ako aj v mŕtvom materiáli. Tým môže prispieť ku OOC a DM korekciám v rámci LC. Výhodou tohto nástroja aj jeho variabilita, extrapolácia častíc môže byť veľmi ľahko prispôsobená požiadavkám príslušnej analýzy.

5 Záver

V predloženom autoreferáte je v stručnosti prezentovaný projekt a výsledky dizertačnej práce. Všetky analýzy vznikli v rámci spolupráce na experimente ATLAS a sú časťou oficiálneho príspevku slovenskej ATLAS skupiny ku kalibrácii kalorimetrického systému. Ciele práce boli splnené a jednotlivé výsledky sú príspevkom k hadrónovej kalibrácii. Všetky príspevky boli prednesené a diskutované na mnohých mítingoch pracovných skupín, prípadne sa stali časťami interných nót, ale zatiaľ nie sú súčasťou oficiálne publikovaných materiálov. Príspevok k analýze TB je súčasťou článku, ktorý je v záverečnej fáze príprav a schvalovania kolaboráciou, a bude publikovaný v časopise Nuclear Instruments and Methods.

Pripravované publikácie:

- [I] *Validation of local hadron calibration with combined beam tests for the endcap and forward calorimeters of ATLAS in the pseudorapidity range $2.5 < |\eta| < 4.0$.* Nuclear Instruments and Methods.
- [II] *Local Hadron Calibration: A reconstruction and calibration method of hadronic energy deposits in the ATLAS Calorimeters.* Nuclear Instruments and Methods.

Publikácie:

- [III.] ATLAS COLLABORATION. *Search for new particles in two-jet final states in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC.* Physical Review Letters, Vol. 105, No. 16 (2010), Art. No. 161801, s. 1-19

- [IV.] ATLAS COLLABORATION. *Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s}=900$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC*. Physics Letters B, Vol. 688, No. 1 (2010), s. 21-42
- [V.] ATLAS COLLABORATION. *Performance of the ATLAS detector using first collision data*. Journal of High Energy Physics, No. 9 (2010), Art. No. 056, s. 1-62
- [VI.] ATLAS COLLABORATION. *Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s} = 90$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC*. Physics Letters B, Vol. 688, No. 1 (2010), s. 21-42
- [VII.] MARTIN PÉCSY. *Validácia lokálnej hadrónovej kalibrácie experimentu ATLAS na Test-Beam dátach*. Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava 2010: Zborník príspevkov, Bratislava: Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, 2010 S. 216-220
- [VIII.] ATLAS COLLABORATION. *Expected performance of the ATLAS experiment: detector, trigger and physics: Vol. 1: Performance*. Geneva : CERN, 2009
- [IX.] ATLAS COLLABORATION. *Expected performance of the ATLAS experiment: detector, trigger and physics: Vol. 2: Standard model, top quark, B-physics*. Geneva : CERN, 2009
- [X.] ATLAS COLLABORATION. *Expected performance of the ATLAS experiment: detector, trigger and physics: Vol. 3: Higgs boson, supersymmetry, exotic processes*. Geneva : CERN, 2009

Literatúra:

- [1] ATLAS COLLABORATION. 1992. *Letter of Intent for a General-Purpose pp experiment at the Large Hadron Collider at CERN*. CERN Archives. 1992. CERN-LHCC-92-4.
- [2] ATLAS COLLABORATION. 2008. *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*. JINST 3 S08003. 2008. 438 p. ISSN 1748-0221 (Online).

- [3] EVANS, L. - BRYANT, P. (editors) 2008. *LHC Machine*. JINST 3 S08001. 2008. 165 p. ISSN 1748-0221.
- [4] BARILLARI, T. - ET AL. 2009. *Local Hadronic Calibration*. CERN. 2009. 57 p. ATL-LARG-PUB-2009-001-2, ATL-COM-LARG-2008-006.
- [5] LAMPL, W. - ET. AL. 2008. *Calorimeter Clustering Algorithms: Description and Performance*. CERN. 2008. 18 p. ATL-LARG-PUB-2008-002, ATL-COM-LARG-2008-003
- [6] GRINDHAMMER, G. - RUDOWICZ, M. - PETERS, S. 1990. *The fast simulation of electromagnetic and hadronic showers* Nuclear Instruments and Methods Section A. Volume 290. 469-488 p. ISSN: 0168-9002.
- [7] GEANT4 COLLABORATION. 2003. *GEANT4 — a simulation toolkit* Nuclear Instruments and Methods Section A. Volume 506. 250-303 p. ISSN: 0168-9002.
- [8] PINFOLD, J. - ET AL. *Performance of the ATLAS liquid argon endcap calorimeter in the pseudorapidity region $2.5 < |\eta| < 4.0$ in beam tests*. Nuclear Instruments and Methods Section A. Volume 593. 324-342 p. ISSN: 0168-9002.
- [9] GEANT4 WEB PAGE. *GEANT4 - Reference Physics Lists*. [online]. http://geant4.cern.ch/support/proc_mod_catalog/physics_lists/referencePL.shtml

Summary

Different contributions to ATLAS calorimeter calibration have been presented in the thesis. All the studies were done within the ATLAS experiment collaboration and are a part of the official contribution of the Slovak ATLAS group to the calibration of ATLAS calorimeter. All the contributions have been presented and discussed on many collaboration groups meetings, and some of them are part of internal notes which have not been officially published yet. The paper containing the contribution to validation of LC in beam tests is in the phase of preparations and approving by collaboration, and will be published in the Nuclear Instruments and Methods.

The commissioning phase of ATLAS calorimeter was very important for understanding the detector performance. In the contribution to calorimeter commissioning

and EM scale studies, the statistics of cosmic-ray muons events from the global cosmic runs in 2008 and 2009 have been selected. The selected statistics were used for additional HEC signal studies. In this part, also the HEC channels response homogeneity in recent LHC runs has been studied.

The MC based studies of alternative cluster classifications used in LC are presented in the next section. The studies showed, that the classification method currently used in LC is sufficient and by adding the additional classification no profit in global improvement of method can be achieved. Both alternative methods showed only slight improvement of LC performance.

The studies of combined end-cap calorimeter beam test runs with electrons and pions has been presented in the next contribution. Performance of LC have been tested in several energy and position scans and experimental runs have been compared with simulations. The data showed good agreement with MC predictions. The full hadronic calibration and energy reconstruction of ATLAS calorimeters have been validated.

The tool for possible improvements of LC method has been discussed in the last part. Developed tool, which is a part of official ATLAS software, allows detailed studies of the particles sector and its main contribution to LC is in low energy studies.

The results of particular analysis presented in the thesis are contributions to the hadronic calibration, and many of them are now standardly used in production of ATLAS physics results.